

Grafer og graf-gennemløb

Grafer

En mængde V af *knuder* (vertices).

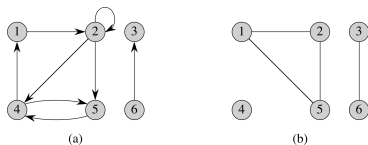
En mængde $E \in V \times V$ af *kanter* (edges). Dvs. ordnede par af knuder.

Grafer

En mængde V af *knuder* (vertices).

En mængde $E \subseteq V \times V$ af *kanter* (edges). Dvs. ordnede par af knuder.

Figur:



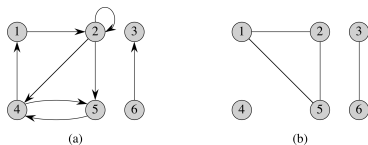
- ▶ Terminologi: $n = |V|$, $m = |E|$. Eller V og E genbruges/misbruges til også at betyde $|V|$ og $|E|$.

Grafer

En mængde V af *knuder* (vertices).

En mængde $E \subseteq V \times V$ af *kanter* (edges). Dvs. ordnede par af knuder.

Figur:



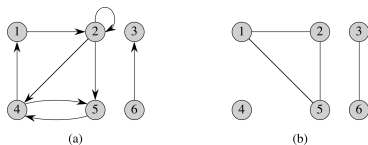
- ▶ Terminologi: $n = |V|$, $m = |E|$. Eller V og E genbruges/misbruges til også at betyde $|V|$ og $|E|$.
- ▶ Orienteret vs. uorienteret.

Grafer

En mængde V af *knuder* (vertices).

En mængde $E \in V \times V$ af *kanter* (edges). Dvs. ordnede par af knuder.

Figur:



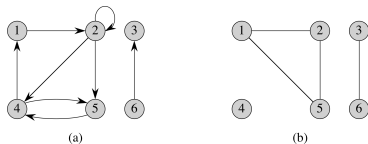
- ▶ Terminologi: $n = |V|$, $m = |E|$. Eller V og E genbruges/misbruges til også at betyde $|V|$ og $|E|$.
- ▶ Orienteret vs. uorienteret.
- ▶ $0 \leq m \leq n(n-1)$ og $0 \leq m \leq n(n-1)/2$

Grafer

En mængde V af *knuder* (vertices).

En mængde $E \subseteq V \times V$ af *kanter* (edges). Dvs. ordnede par af knuder.

Figur:



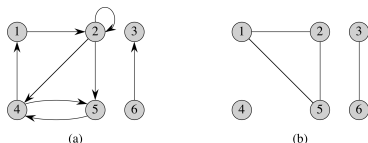
- ▶ Terminologi: $n = |V|$, $m = |E|$. Eller V og E genbruges/misbruges til også at betyde $|V|$ og $|E|$.
- ▶ Orienteret vs. uorienteret.
- ▶ $0 \leq m \leq n(n-1)$ og $0 \leq m \leq n(n-1)/2$
- ▶ Evt. loops, multiple kanter.

Grafer

En mængde V af *knuder* (vertices).

En mængde $E \subseteq V \times V$ af *kanter* (edges). Dvs. ordnede par af knuder.

Figur:

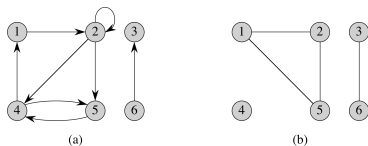


- ▶ Terminologi: $n = |V|$, $m = |E|$. Eller V og E genbruges/misbruges til også at betyde $|V|$ og $|E|$.
- ▶ Orienteret vs. uorienteret.
- ▶ $0 \leq m \leq n(n-1)$ og $0 \leq m \leq n(n-1)/2$
- ▶ Evt. loops, multiple kanter.
- ▶ Vægtede grafer.

Grafer

Modeller for mange ting:

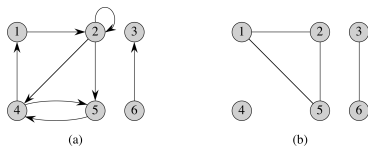
- ▶ Ledningsnet (telefon, strøm, olie, vand, ...).



Grafer

Modeller for mange ting:

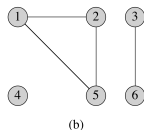
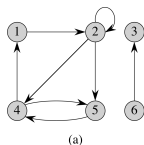
- ▶ Ledningsnet (telefon, strøm, olie, vand, ...).
- ▶ Vejnet.



Grafer

Modeller for mange ting:

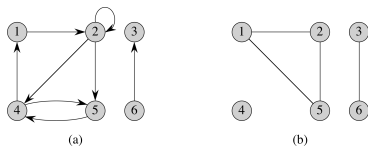
- ▶ Ledningsnet (telefon, strøm, olie, vand, ...).
- ▶ Vejnet.
- ▶ Bekendtskaber.



Grafer

Modeller for mange ting:

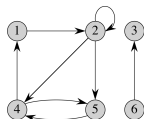
- ▶ Ledningsnet (telefon, strøm, olie, vand, ...).
- ▶ Vejnet.
- ▶ Bekendtskaber.
- ▶ Medforfatterskaber.



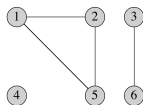
Grafer

Modeller for mange ting:

- ▶ Ledningsnet (telefon, strøm, olie, vand, ...).
- ▶ Vejnet.
- ▶ Bekendtskaber.
- ▶ Medforfatterskaber.
- ▶ WWW-grafen af sider og links.



(a)



(b)

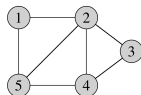
Datastrukturer for grafer

Graf-repræsentationer:

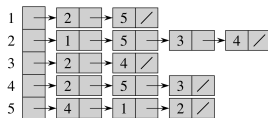
Datastrukturer for grafer

Graf-præsentationer:

Adjacency list og adjacency matrix



(a)



(b)

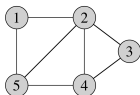
	1	2	3	4	5
1	0	1	0	0	1
2	1	0	1	1	1
3	0	1	0	1	0
4	0	1	1	0	1
5	1	1	0	1	0

(c)

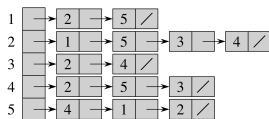
Datastrukturer for grafer

Graf-repræsentationer:

Adjancency list og adjancency matrix



(a)



(b)

	1	2	3	4	5
1	0	1	0	0	1
2	1	0	1	1	1
3	0	1	0	1	0
4	0	1	1	0	1
5	1	1	0	1	0

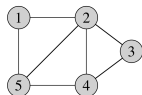
(c)

Plads: Henholdsvis $O(n + m)$ og $O(n^2)$.

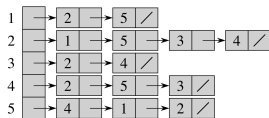
Datastrukturer for grafer

Graf-repræsentationer:

Adjacency list og adjacency matrix



(a)



(b)

	1	2	3	4	5
1	0	1	0	0	1
2	1	0	1	1	1
3	0	1	0	1	0
4	0	1	1	0	1
5	1	1	0	1	0

(c)

Plads: Henholdsvis $O(n + m)$ og $O(n^2)$.

Hvis ikke andet oplyses, bruges adjacency list repræsentationen i algoritmer i resten af kurset.

Husk: en kant i en uorienterede graf repræsenteres som to orienterede kanter.

Grafgennemløb

To grundlæggende metoder:

- ▶ Breath-First-Search (BFS)
- ▶ Depth-First-Search (DFS):

Grafgennemløb

To grundlæggende metoder:

- ▶ Breath-First-Search (BFS)
- ▶ Depth-First-Search (DFS):

Fælles for BFS og DFS:

Grafgennemløb

To grundlæggende metoder:

- ▶ Breath-First-Search (BFS)
- ▶ Depth-First-Search (DFS):

Fælles for BFS og DFS:

- ▶ En startknode (source) s

Grafgennemløb

To grundlæggende metoder:

- ▶ Breath-First-Search (**BFS**)
- ▶ Depth-First-Search (**DFS**):

Fælles for BFS og DFS:

- ▶ En startknode (source) **s**
- ▶ Ikke-mødte knuder er **hvide**

Grafgennemløb

To grundlæggende metoder:

- ▶ Breath-First-Search (**BFS**)
- ▶ Depth-First-Search (**DFS**):

Fælles for BFS og DFS:

- ▶ En startknode (source) **s**
- ▶ Ikke-mødte knuder er **hvide**
- ▶ Færdigbehandlede knuder er **sorte**

Grafgennemløb

To grundlæggende metoder:

- ▶ Breath-First-Search (BFS)
- ▶ Depth-First-Search (DFS):

Fælles for BFS og DFS:

- ▶ En startknode (source) s
- ▶ Ikke-mødte knuder er hvide
- ▶ Færdigbehandlede knuder er sorte
- ▶ Knuder i fronten (mødte, men ikke færdigbehandlede) er grå

Grafgennemløb

To grundlæggende metoder:

- ▶ Breath-First-Search (BFS)
- ▶ Depth-First-Search (DFS):

Fælles for BFS og DFS:

- ▶ En startknode (source) s
- ▶ Ikke-mødte knuder er hvide
- ▶ Færdigbehandlede knuder er sorte
- ▶ Knuder i fronten (mødte, men ikke færdigbehandlede) er grå
- ▶ Når en knude v ($\neq s$) mødes første gang husker den, hvem der opdagede den (dens predecessor) i variabelen $v.\pi$.

Grafgennemløb

To grundlæggende metoder:

- ▶ Breath-First-Search (BFS)
- ▶ Depth-First-Search (DFS):

Fælles for BFS og DFS:

- ▶ En startknode (source) s
- ▶ Ikke-mødte knuder er hvide
- ▶ Færdigbehandlede knuder er sorte
- ▶ Knuder i fronten (mødte, men ikke færdigbehandlede) er grå
- ▶ Når en knude v ($\neq s$) mødes første gang husker den, hvem der opdagede den (dens predecessor) i variabelen $v.\pi$.
- ▶ Vi bruger adjacency list repræsentationen.

Grafgennemløb

To grundlæggende metoder:

- ▶ Breath-First-Search (BFS)
- ▶ Depth-First-Search (DFS):

Fælles for BFS og DFS:

- ▶ En startknode (source) s
- ▶ Ikke-mødte knuder er hvide
- ▶ Færdigbehandlede knuder er sorte
- ▶ Knuder i fronten (mødte, men ikke færdigbehandlede) er grå
- ▶ Når en knude v ($\neq s$) mødes første gang husker den, hvem der opdagede den (dens predecessor) i variabelen $v.\pi$.
- ▶ Vi bruger adjacency list repræsentationen.

Bemærk: Kanterne $(v, v.\pi)$ udgør tilsammen altid et træ med s som rod og indeholdende alle opdagede knuder (ses nemt via induktion over antal mødte knuder).

Bredde-Først-Søgning (BFS)

Holder de grå knuder (fronten) i en **KØ**.

Bredde-Først-Søgning (BFS)

Holder de grå knuder (fronten) i en $KØ$.

Tilføjer også en variabel $v.d$ til alle knuder v (d for distance.)

Bredde-Først-Søgning (BFS)

Holder de grå knuder (fronten) i en **KØ**.

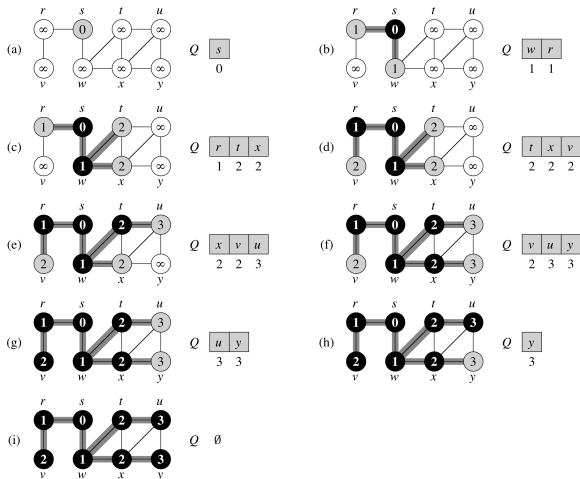
Tilføjer også en variabel **$v.d$** til alle knuder v (d for distance.)

BFS(G, s)

```
1  for each vertex  $u \in G.V - \{s\}$ 
2       $u.color = \text{WHITE}$ 
3       $u.d = \infty$ 
4       $u.\pi = \text{NIL}$ 
5   $s.color = \text{GRAY}$ 
6   $s.d = 0$ 
7   $s.\pi = \text{NIL}$ 
8   $Q = \emptyset$ 
9  ENQUEUE( $Q, s$ )
10 while  $Q \neq \emptyset$ 
11      $u = \text{DEQUEUE}(Q)$ 
12     for each  $v \in G.Adj[u]$ 
13         if  $v.color == \text{WHITE}$ 
14              $v.color = \text{GRAY}$ 
15              $v.d = u.d + 1$ 
16              $v.\pi = u$ 
17             ENQUEUE( $Q, v$ )
18      $u.color = \text{BLACK}$ 
```

Bredde-Først-Søgning (BFS)

Eksempel:



Egenskaber

Køretid: $O(n + m)$

Egenskaber

Køretid: $O(n + m)$

Bevis: Initialisering tager $O(n)$ tid. I resten af algoritmen kan en knude ikke indsættes i køen mere end een gang (pga. farvemærkningen), så maksimalt arbejde er proportionalt med eet gennemløb af alle nabolister, dvs. $O(m)$ arbejde.

Egenskaber

Køretid: $O(n + m)$

Bevis: Initialisering tager $O(n)$ tid. I resten af algoritmen kan en knude ikke indsættes i køen mere end een gang (pga. farvemærkningen), så maksimalt arbejde er proportionalt med eet gennemløb af alle nabolister, dvs. $O(m)$ arbejde.

Definition: $\delta(s, v)$ er længden af en korteste sti, *målt i antal kanter*, fra startknuden s til knuden v . Findes ingen sti, defineres $\delta(s, v) = \infty$.

Egenskaber

Køretid: $O(n + m)$

Bevis: Initialisering tager $O(n)$ tid. I resten af algoritmen kan en knude ikke indsættes i køen mere end een gang (pga. farvemærkningen), så maksimalt arbejde er proportionalt med eet gennemløb af alle nabolister, dvs. $O(m)$ arbejde.

Definition: $\delta(s, v)$ er længden af en korteste sti, *målt i antal kanter*, fra startknuden s til knuden v . Findes ingen sti, defineres $\delta(s, v) = \infty$.

Sætning:

1. Når BFS stopper, har den nået alle knuder v for hvilke der findes en sti fra startknuden s til v .
2. En sti af længde $v.d$ kan for alle nåede knuder findes (i baglæns rækkefølge) ved at følge predecessor-referencer $v.d$ gange, startende fra v (dvs. $v.\pi$, $(v.\pi).\pi$, $((v.\pi).\pi).\pi, \dots$), og $.d$ -værdierne for knuderne på denne sti falder med een for hvert skridt.
3. Når BFS stopper, gælder $v.d = \delta(s, v)$ for alle knuder.

Egenskaber

Køretid: $O(n + m)$

Bevis: Initialisering tager $O(n)$ tid. I resten af algoritmen kan en knude ikke indsættes i køen mere end een gang (pga. farvemærkningen), så maksimalt arbejde er proportionalt med eet gennemløb af alle nabolister, dvs. $O(m)$ arbejde.

Definition: $\delta(s, v)$ er længden af en korteste sti, *målt i antal kanter*, fra startknuden s til knuden v . Findes ingen sti, defineres $\delta(s, v) = \infty$.

Sætning:

1. Når BFS stopper, har den nået alle knuder v for hvilke der findes en sti fra startknuden s til v .
2. En sti af længde $v.d$ kan for alle nåede knuder findes (i baglæns rækkefølge) ved at følge predecessor-referencer $v.d$ gange, startende fra v (dvs. $v.\pi$, $(v.\pi).\pi$, $((v.\pi).\pi).\pi, \dots$), og $.d$ -værdierne for knuderne på denne sti falder med een for hvert skridt.
3. Når BFS stopper, gælder $v.d = \delta(s, v)$ for alle knuder.

Dvs. BFS kan finde korteste veje (målt i antal kanter) fra alle v til s .

Bevis

Bemærk først at en knude v indsættes i køen een gang, så $v.d$ og $v.\pi$ gives en værdi præcis een gang.

Bevis

Bemærk først at en knude v indsættes i køen een gang, så $v.d$ og $v.\pi$ gives en værdi præcis een gang.

Punkt 1):

Bevis

Bemærk først at en knude v indsættes i køen een gang, så $v.d$ og $v.\pi$ gives en værdi præcis een gang.

Punkt 1):

Antag der findes en knude, som kan nås med en sti fra s , men som BFS ikke når. Lad v være første knude (set fra s) på denne sti som BFS ikke når, og lad u være knuden før på stien. Da u blev taget ud af køen, burde v (som er i u 's naboliste) være nået. Modstrid.

Bevis

Bemærk først at en knude v indsættes i køen een gang, så $v.d$ og $v.\pi$ gives en værdi præcis een gang.

Punkt 1):

Antag der findes en knude, som kan nås med en sti fra s , men som BFS ikke når. Lad v være første knude (set fra s) på denne sti som BFS ikke når, og lad u være knuden før på stien. Da u blev taget ud af køen, burde v (som er i u 's naboliste) være nået. Modstrid.

Punkt 2):

Bevis

Bemærk først at en knude v indsættes i køen een gang, så $v.d$ og $v.\pi$ gives en værdi præcis een gang.

Punkt 1):

Antag der findes en knude, som kan nås med en sti fra s , men som BFS ikke når. Lad v være første knude (set fra s) på denne sti som BFS ikke når, og lad u være knuden før på stien. Da u blev taget ud af køen, burde v (som er i u 's naboliste) være nået. Modstrid.

Punkt 2):

Induktion over antal indsættelser i køen: Når en knude u udtages af køen, og en knude v fra u 's naboliste indsættes i køen, sættes $v.d = u.d + 1$ og $v.\pi = u$. Hvis udsagnet galdt for u , kommer det klart til at gælde for v . Basis er første indsættelse (af s , for hvilken udsagnet gælder pga. initialiseringen i BFS).

Bevis

Punkt 3):

Bevis

Punkt 3):

Definér for heltal $i \geq 0$:

- ▶ $\Delta_i = \{v \in V \mid \delta(s, v) = i\}$, dvs. de knuder, som faktisk har afstand i til s .
- ▶ $D_i = \{v \in V \mid v.d = i\}$, dvs. de knuder, som algoritmen påstår har afstand i til s .

Bevis

Punkt 3):

Definér for heltal $i \geq 0$:

- ▶ $\Delta_i = \{v \in V \mid \delta(s, v) = i\}$, dvs. de knuder, som faktisk har afstand i til s .
- ▶ $D_i = \{v \in V \mid v.d = i\}$, dvs. de knuder, som algoritmen påstår har afstand i til s .

Vi viser via induktion på i at for alle i gælder

$$\Delta_i = D_i.$$

Bevis

Punkt 3):

Definér for heltal $i \geq 0$:

- ▶ $\Delta_i = \{v \in V \mid \delta(s, v) = i\}$, dvs. de knuder, som faktisk har afstand i til s .
- ▶ $D_i = \{v \in V \mid v.d = i\}$, dvs. de knuder, som algoritmen påstår har afstand i til s .

Vi viser via induktion på i at for alle i gælder

$$\Delta_i = D_i.$$

Dette vil medføre punkt 3) for alle knuder, der kan nås fra s . For resten af knuderne forbliver $v.d = \infty$ efter initialisering [pga. punkt 2)], så punkt 3) gælder også for dem.

Bevis

Punkt 3):

Definér for heltal $i \geq 0$:

- ▶ $\Delta_i = \{v \in V \mid \delta(s, v) = i\}$, dvs. de knuder, som faktisk har afstand i til s .
- ▶ $D_i = \{v \in V \mid v.d = i\}$, dvs. de knuder, som algoritmen påstår har afstand i til s .

Vi viser via induktion på i at for alle i gælder

$$\Delta_i = D_i.$$

Dette vil medføre punkt 3) for alle knuder, der kan nås fra s . For resten af knuderne forbliver $v.d = \infty$ efter initialisering [pga. punkt 2)], så punkt 3) gælder også for dem.

Observér først at BFS-algoritmen starter med $D_0 = \{s\}$ i køen, og derefter for $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ udtager alle knuder i D_i mens den indsætter alle knuder i D_{i+1} .

Bevis

Induktionsbevis for $\Delta_i = D_i$:

Bevis

Induktionsbevis for $\Delta_i = D_i$:

Basis (i=0): klar, da $D_0 = \{s\} = \Delta_0$.

Bevis

Induktionsbevis for $\Delta_i = D_i$:

Basis ($i=0$): klar, da $D_0 = \{s\} = \Delta_0$.

Induktionsskridt: antag udsagn er sandt for $i - 1$ og lavere, vis det er sandt for i .

Bevis

Induktionsbevis for $\Delta_i = D_i$:

Basis ($i=0$): klar, da $D_0 = \{s\} = \Delta_0$.

Induktionsskridt: antag udsagn er sandt for $i - 1$ og lavere, vis det er sandt for i .

For en knude $v \in D_i$ eksisterer via punkt 2) en sti fra s til v af længde i . Derfor gælder $\delta(s, v) \leq i$. Vi kan ikke have $\delta(s, v) \leq i - 1$, da induktionsantagelse så ville give $v.d = \delta(s, v) \leq i - 1$, i modstrid med $v \in D_i$. Derfor er $\delta(s, v) = i$. Dette viser $D_i \subseteq \Delta_i$.

Bevis

Induktionsbevis for $\Delta_i = D_i$:

Basis ($i=0$): klar, da $D_0 = \{s\} = \Delta_0$.

Induktionsskridt: antag udsagn er sandt for $i - 1$ og lavere, vis det er sandt for i .

For en knude $v \in D_i$ eksisterer via punkt 2) en sti fra s til v af længde i . Derfor gælder $\delta(s, v) \leq i$. Vi kan ikke have $\delta(s, v) \leq i - 1$, da induktionsantagelse så ville give $v.d = \delta(s, v) \leq i - 1$, i modstrid med $v \in D_i$. Derfor er $\delta(s, v) = i$. Dette viser $D_i \subseteq \Delta_i$.

For enhver knude $u \in \Delta_i$ eksisterer pr. definition af δ en sti fra s til u af længde i . For næstsidste knude w på denne sti gælder $\delta(s, w) = i - 1$. Fra induktionsantagelsen får vi at $w.d = \delta(s, w)$. Da w blev taget ud af køen, var u (en nabo til w) enten hvid, eller u var allerede nået fra en knude t , som allerede var taget ud og derfor (via observationen på sidste side) har $t.d \leq w.d$. I begge tilfælde bliver $u.d$ sat til højst $w.d + 1 = \delta(s, w) + 1 = i = \delta(s, u)$. Fra punkt 2) haves $u.d \geq \delta(s, u)$. I alt gælder $u.d = \delta(s, u)$. Dette viser $\Delta_i \subseteq D_i$.

Bevis

Induktionsbevis for $\Delta_i = D_i$:

Basis ($i=0$): klar, da $D_0 = \{s\} = \Delta_0$.

Induktionsskridt: antag udsagn er sandt for $i - 1$ og lavere, vis det er sandt for i .

For en knude $v \in D_i$ eksisterer via punkt 2) en sti fra s til v af længde i . Derfor gælder $\delta(s, v) \leq i$. Vi kan ikke have $\delta(s, v) \leq i - 1$, da induktionsantagelse så ville give $v.d = \delta(s, v) \leq i - 1$, i modstrid med $v \in D_i$. Derfor er $\delta(s, v) = i$. Dette viser $D_i \subseteq \Delta_i$.

For enhver knude $u \in \Delta_i$ eksisterer pr. definition af δ en sti fra s til u af længde i . For næstsidste knude w på denne sti gælder $\delta(s, w) = i - 1$. Fra induktionsantagelsen får vi at $w.d = \delta(s, w)$. Da w blev taget ud af køen, var u (en nabo til w) enten hvid, eller u var allerede nået fra en knude t , som allerede var taget ud og derfor (via observationen på sidste side) har $t.d \leq w.d$. I begge tilfælde bliver $u.d$ sat til højst $w.d + 1 = \delta(s, w) + 1 = i = \delta(s, u)$. Fra punkt 2) haves $u.d \geq \delta(s, u)$. I alt gælder $u.d = \delta(s, u)$. Dette viser $\Delta_i \subseteq D_i$.

Alt i alt: $\Delta_i = D_i$.

Dybde-Først-Søgning (DFS)

Holder de grå knuder (fronten) i en **STAK**.

Dybde-Først-Søgning (DFS)

Holder de grå knuder (fronten) i en **STAK**.

Stakken er implicit i den rekursive formulering nedenfor (er rekursionsstakken), men kan også kodes eksplicit.

Mere præcist: elementerne på stakken er de grå knuder, hver med en delvist gennemløbet naboliste [gennemløbet i for-løkken i DFS-VISIT].

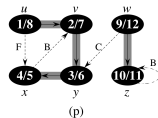
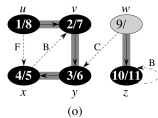
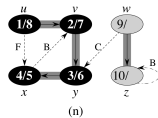
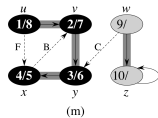
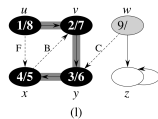
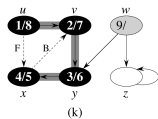
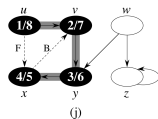
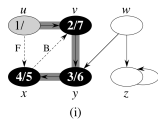
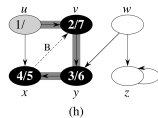
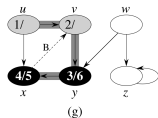
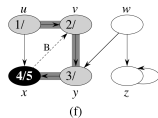
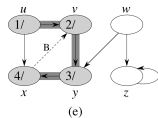
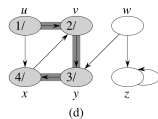
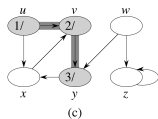
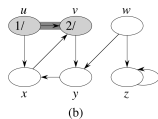
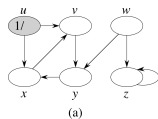
DFS tilføjer også timestamps $u.d$ for “discovery” (hvid \rightarrow grå) og $u.f$ for “finish” (grå \rightarrow sort) til alle knuder u .

```
DFS(G)
1  for each vertex  $u \in G.V$ 
2     $u.color = WHITE$ 
3     $u.\pi = NIL$ 
4   $time = 0$ 
5  for each vertex  $u \in G.V$ 
6    if  $u.color == WHITE$ 
7      DFS-VISIT( $G, u$ )

DFS-VISIT( $G, u$ )
1   $time = time + 1$  // white vertex  $u$  has just been discovered
2   $u.d = time$ 
3   $u.color = GRAY$ 
4  for each  $v \in G.Adj[u]$  // explore edge ( $u, v$ )
5    if  $v.color == WHITE$ 
6       $v.\pi = u$ 
7      DFS-VISIT( $G, v$ )
8   $u.color = BLACK$  // blacken  $u$ ; it is finished
9   $time = time + 1$ 
10  $u.f = time$ 
```

Dybde-Først-Søgning (DFS)

Eksempel:



Egenskaber

Køretid: $O(n + m)$

Egenskaber

Køretid: $O(n + m)$

Bevis: Den ydre algoritme DFS tager $O(n)$ tid. Hovedalgoritmen DFS-VISIT kan ikke kaldes på en knude mere end een gang (pga. farvemærkningen), så arbejdet dér er proportionalt med eet gennemløb af alle nabolister, dvs. $O(m)$ arbejde.

Egenskaber

Køretid: $O(n + m)$

Bevis: Den ydre algoritme DFS tager $O(n)$ tid. Hovedalgoritmen DFS-VISIT kan ikke kaldes på en knude mere end een gang (pga. farvemærkningen), så arbejdet dér er proportionalt med eet gennemløb af alle nabolister, dvs. $O(m)$ arbejde.

Observér:

- ▶ Discovery (hvid \rightarrow grå) af $v =$ sæt $v.d =$ kald af DFS-VISIT på $v =$ PUSH af v på stakken.
- ▶ Finish (grå \rightarrow sort) af $v =$ sæt $v.f =$ retur fra kald af DFS-VISIT på $v =$ POP af v fra stakken.

Egenskaber

Køretid: $O(n + m)$

Bevis: Den ydre algoritme DFS tager $O(n)$ tid. Hovedalgoritmen DFS-VISIT kan ikke kaldes på en knude mere end een gang (pga. farvemærkningen), så arbejdet dér er proportionalt med eet gennemløb af alle nabolister, dvs. $O(m)$ arbejde.

Observér:

- ▶ Discovery (hvid \rightarrow grå) af v = sæt $v.d$ = kald af DFS-VISIT på v = PUSH af v på stakken.
- ▶ Finish (grå \rightarrow sort) af v = sæt $v.f$ = retur fra kald af DFS-VISIT på v = POP af v fra stakken.

Kanten $(v, v.\pi)$ sættes ved kald af DFS-VISIT på v . Af dette, samt ovenstående:

- ▶ Kanterne $(v, v.\pi)$ udgør præcis rekursionstræerne for DFS-VISIT (eet træ for hvert kald fra DFS).
- ▶ Intervallet $[v.d, v.f]$ er den periode v er på stakken.

Egenskaber

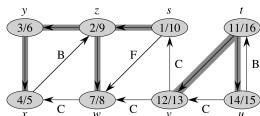
Hvis u og v er på en stak samtidig, og v er pushed sidst, må v poppes før u kan poppes.

Af dette, samt at push/pop sætter d/f , følger at for alle knuder u og v må intervallerne $[u.d, u.f]$ og $[v.d, v.f]$ enten være disjunkte (u og v var ikke på stakken samtidig) eller det ene må være helt indeholdt i den andet (knuden med det største interval kom på stakken først).

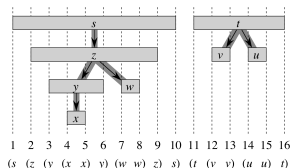
Egenskaber

Hvis u og v er på en stak samtidig, og v er pushed sidst, må v poppes før u kan poppes.

Af dette, samt at push/pop sætter d/f , følger at for alle knuder u og v må intervallerne $[u.d, u.f]$ og $[v.d, v.f]$ enten være disjunkte (u og v var ikke på stakken samtidig) eller det ene må være helt indeholdt i den andet (knuden med det største interval kom på stakken først).



Discovery- og finish-tider er derfor nestede som parenteser er det.

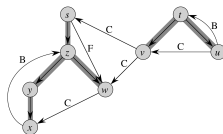
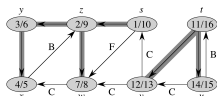


Egenskaber

Når en kant (u, v) undersøges fra u haves flg. tilfælde:

1. *tree-kanter*: v hvid. Her er $u.d < v.d < v.f < u.f$.
2. *back-kanter*: v ikke-hvid (grå/er på stak). Her er $v.d < u.d < u.f < v.f$.
3. *forward-kanter*: v ikke-hvid (sort/er ikke længere på stak, men har været det sammen med u). Her er $u.d < v.d < v.f < u.f$.
4. *cross-kanter*: v ikke-hvid (sort/er ikke længere på stak, og har ikke været det sammen med u). Her er $v.d < v.f < u.d < u.f$.

Bemærk at de kan genkendes under DFS via farvningen og d/f -værdierne i knuder, samt tiden nu.



Egenskaber

1. *tree-kanter*: v hvid
2. *back-kanter*: v ikke-hvid (grå/er på stak) og v 's interval indeholder u 's
3. *forward-kanter*: v ikke-hvid (sort/er ikke længere på stak) og v 's interval er indeholdt i u 's
4. *cross-kanter*: v ikke-hvid (sort/er ikke længere på stak) og v 's interval er før u 's

For *uorienterede grafer* er der kun *tree-kanter* og *back-kanter* (såfremt en kant kategoriseres første gang den undersøges fra een af dens ender).

Dette følger af at u allerede må være blevet undersøgt fra v hvis v er sort/ikke længere på stak og kanten (v, u) må derfor allerede være kategoriseret. Derved kan 3 og 4 ikke opstå.

DAGs og topologisk sortering

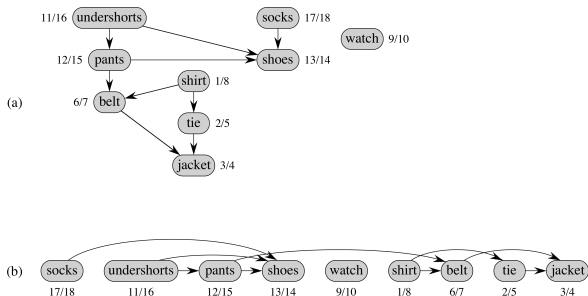
DAG = Directed Acyclic Graph.

Topologisk sortering af en DAG: en lineær ordning af knuderne så alle kanter går fra venstre til højre.

DAGs og topologisk sortering

DAG = Directed Acyclic Graph.

Topologisk sortering af en DAG: en lineær ordning af knuderne så alle kanter går fra venstre til højre.



DAGs og topologisk sortering

Lemma: En orienteret graf har en kreds (cycle) \Leftrightarrow der findes back-edges under et DFS-gennemløb.

DAGs og topologisk sortering

Lemma: En orienteret graf har en kreds (cycle) \Leftrightarrow der findes back-edges under et DFS-gennemløb.

Bevis:

\Rightarrow : Se på første knude v i kredsen som bliver grå - dvs. alle andre knuder u i kredsen har $v.d < u.d$. Da intervaller enten er helt indeholdt i hinanden eller er disjunkte, gælder enten $v.d < u.d < u.f < v.f$ eller $v.f < u.d$.

Antag det sidste tilfælde forekommer, og se på den første (set fra v) sådanne knude u i kredsen, og lad w være dens forgænger (evt. v selv). Da haves $w.f \leq v.f < u.d$, men pga. kanten (w, u) kan dette ikke forekomme (kanten må blive undersøgt, og u opdaget inden w er færdig).

Så kun første tilfælde forekommer. Specielt gælder dette sidste knude u' i kredsen (som peger på v), hvorved kanten (u', v) erklæres en backedge.

DAGs og topologisk sortering

Lemma: En orienteret graf har en kreds (cycle) \Leftrightarrow der findes back-edges under et DFS-gennemløb.

Bevis:

\Rightarrow : Se på første knude v i kredsen som bliver grå - dvs. alle andre knuder u i kredsen har $v.d < u.d$. Da intervaller enten er helt indeholdt i hinanden eller er disjunkte, gælder enten $v.d < u.d < u.f < v.f$ eller $v.f < u.d$.

Antag det sidste tilfælde forekommer, og se på den første (set fra v) sådanne knude u i kredsen, og lad w være dens forgænger (evt. v selv). Da haves $w.f \leq v.f < u.d$, men pga. kanten (w, u) kan dette ikke forekomme (kanten må blive undersøgt, og u opdaget inden w er færdig).

Så kun første tilfælde forekommer. Specielt gælder dette sidste knude u' i kredsen (som peger på v), hvorved kanten (u', v) erklæres en backedge.

\Leftarrow : Når en back-edge findes: Der er en kreds af trækanter (mellem knuderne som lige nu er på stakken) og een back-kant.

DAGs og topologisk sortering

Lemma: For en kant (u, v) gælder $u.f < v.f \Leftrightarrow$ kanten er en back-edge.

DAGs og topologisk sortering

Lemma: For en kant (u, v) gælder $u.f < v.f \Leftrightarrow$ kanten er en back-edge.

Bevis: Check de fire edge cases (tree, back, forward, cross), brug parentes-strukturen af discovery- og finish-tider.

DAGs og topologisk sortering

Lemma: For en kant (u, v) gælder $u.f < v.f \Leftrightarrow$ kanten er en back-edge.

Bevis: Check de fire edge cases (tree, back, forward, cross), brug parentes-strukturen af discovery- og finish-tider.

Korollar til to foregående lemmaer: Graf er en DAG \Leftrightarrow DFS finder ingen back-edges \Leftrightarrow ordning af knuder efter faldende finish-tider giver en topologisk sortering.

DAGs og topologisk sortering

Lemma: For en kant (u, v) gælder $u.f < v.f \Leftrightarrow$ kanten er en back-edge.

Bevis: Check de fire edge cases (tree, back, forward, cross), brug parentes-strukturen af discovery- og finish-tider.

Korollar til to foregående lemmaer: Graf er en DAG \Leftrightarrow DFS finder ingen back-edges \Leftrightarrow ordning af knuder efter faldende finish-tider giver en topologisk sortering.

TOPOLOGICAL-SORT(G)

- 1 call DFS(G) to compute finishing times $v.f$ for each vertex v
- 2 as each vertex is finished, insert it onto the front of a linked list
- 3 **return** the linked list of vertices

DAGs og topologisk sortering

Lemma: For en kant (u, v) gælder $u.f < v.f \Leftrightarrow$ kanten er en back-edge.

Bevis: Check de fire edge cases (tree, back, forward, cross), brug parentes-strukturen af discovery- og finish-tider.

Korollar til to foregående lemmaer: Graf er en DAG \Leftrightarrow DFS finder ingen back-edges \Leftrightarrow ordning af knuder efter faldende finish-tider giver en topologisk sortering.

TOPOLOGICAL-SORT(G)

- 1 call DFS(G) to compute finishing times $v.f$ for each vertex v
- 2 as each vertex is finished, insert it onto the front of a linked list
- 3 **return** the linked list of vertices

Tid: $O(n + m)$.